

復習

- 恒星の色と明るさ
- 恒星はガス球
- 万有引力 \rightleftharpoons 圧力勾配
 - 太陽の中心温度は~1000万度
 - 核融合反応 $4\text{H} \rightarrow {}^4\text{He}$
 - p-p chain, CNO cycle

- 核融合反応からのエネルギー
 - 原子核の束縛エネルギーの差
 - γ 線、粒子のエネルギー、ニュートリノ
- 恒星は安定な核融合炉
 - 負の非熱
 - 核融合反応によるエネルギー \ll 重力エネルギー
 - $GM^2/(RL) \gg \sqrt{[R^3/(GM)]}$ (Lは星の明るさ)

太陽

- 中心で水素の核融合反応
- 年齢~47億年
- Faint young sun paradox

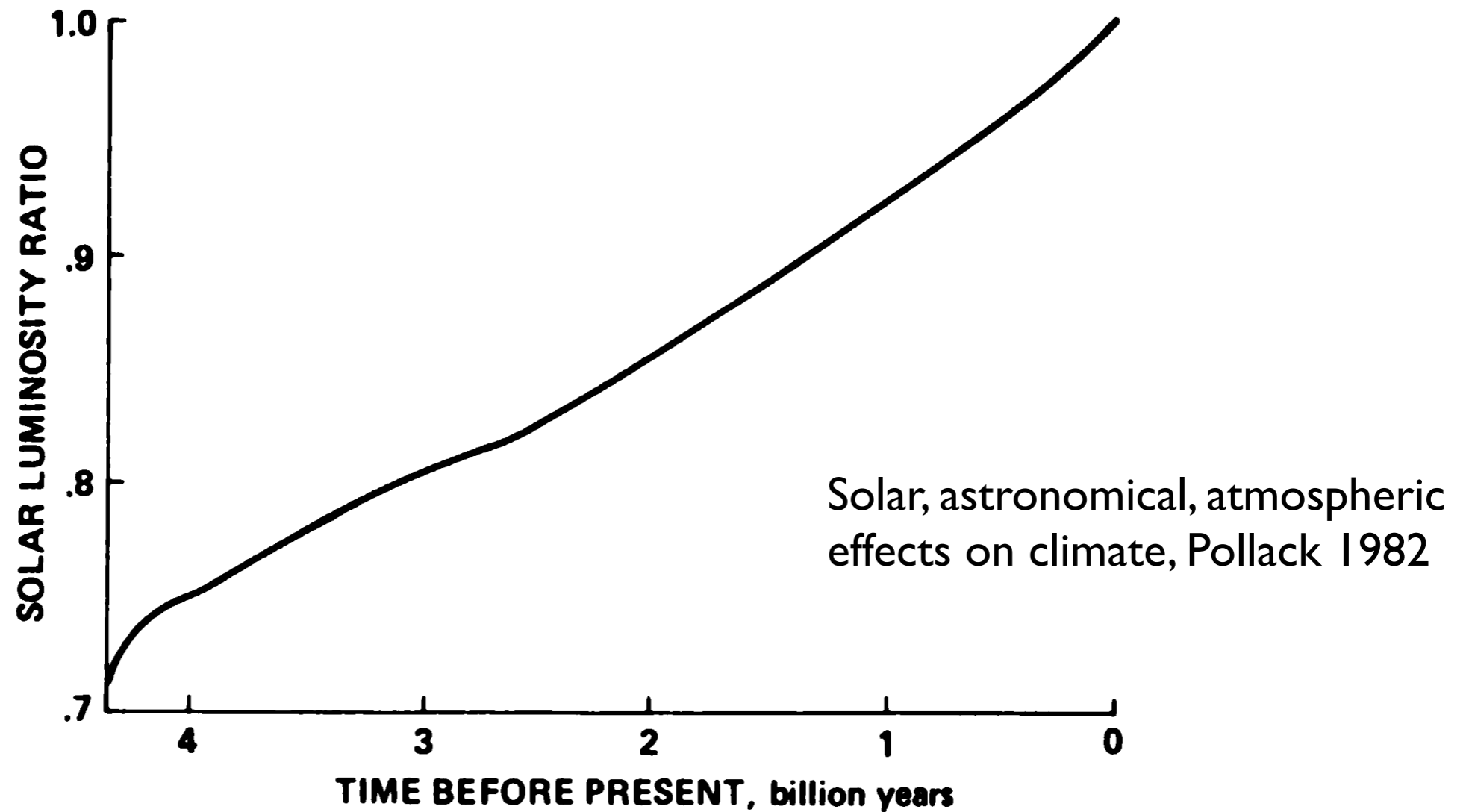
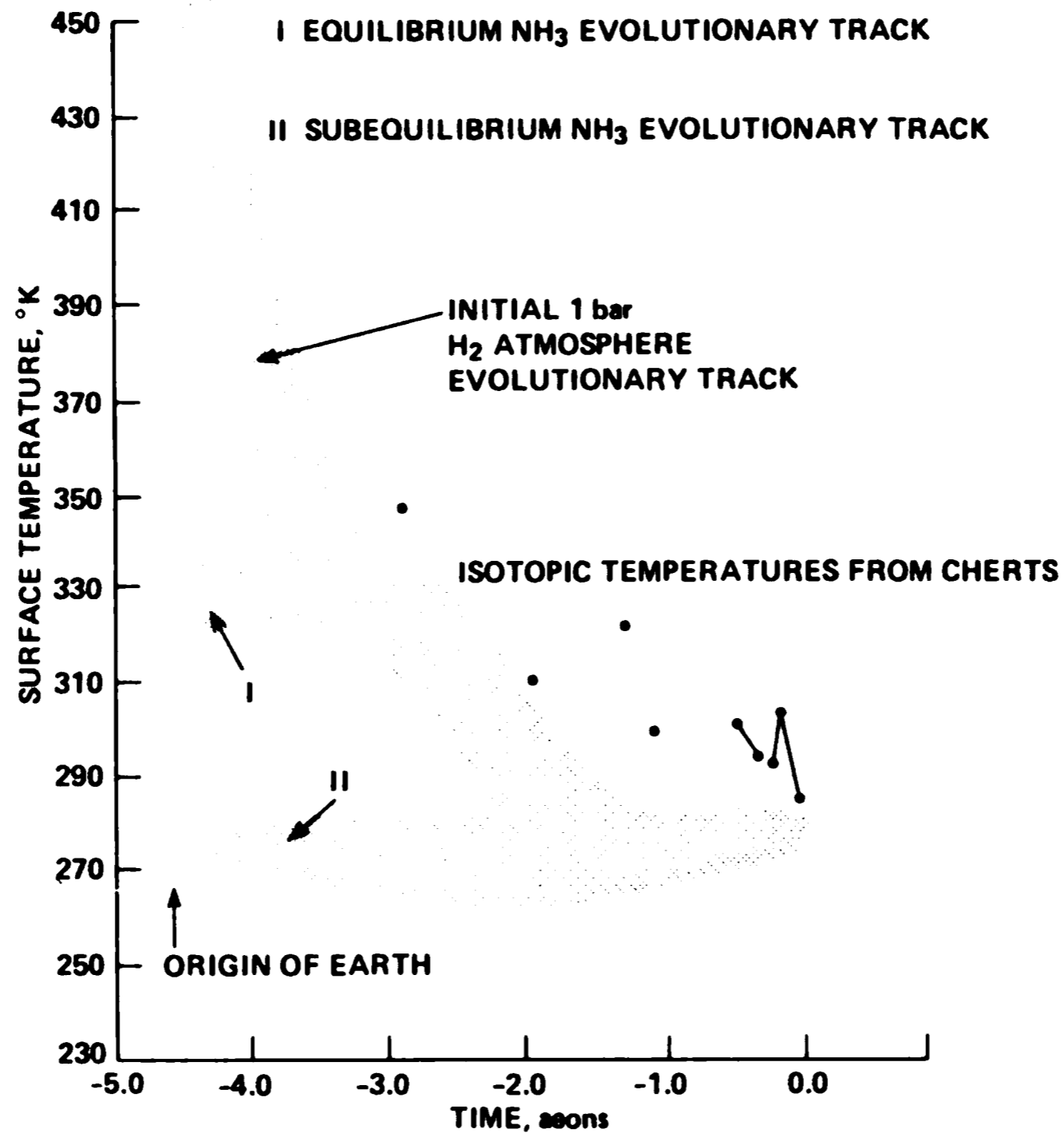


FIGURE 5.2 Solar luminosity as a function of time. The luminosity values have been normalized by the current value. From Stothers as quoted in Canuto and Hsieh (1978).

太陽の明るさの時間変化(星の進化計算による)
太陽は昔、暗かった?

$$P_c = n_c k_B T_c$$

- 数密度 n_c が核融合反応とともに減る
 - 質量当たりの粒子数が減る(質量はほとんど変わらない)
 - 水素= $(1(\text{陽子})+1(\text{電子}))/1(\text{陽子})=2$
 - ヘリウム= $(1(\text{原子核})+2(\text{電子}))/[2(\text{陽子})+2(\text{中性子})]=3/4$
- 圧力は変わらないので温度が上昇
- 核融合反応率が上昇
- 明るくなる



地球の表面温度は昔、高かった

Faint young sun paradox

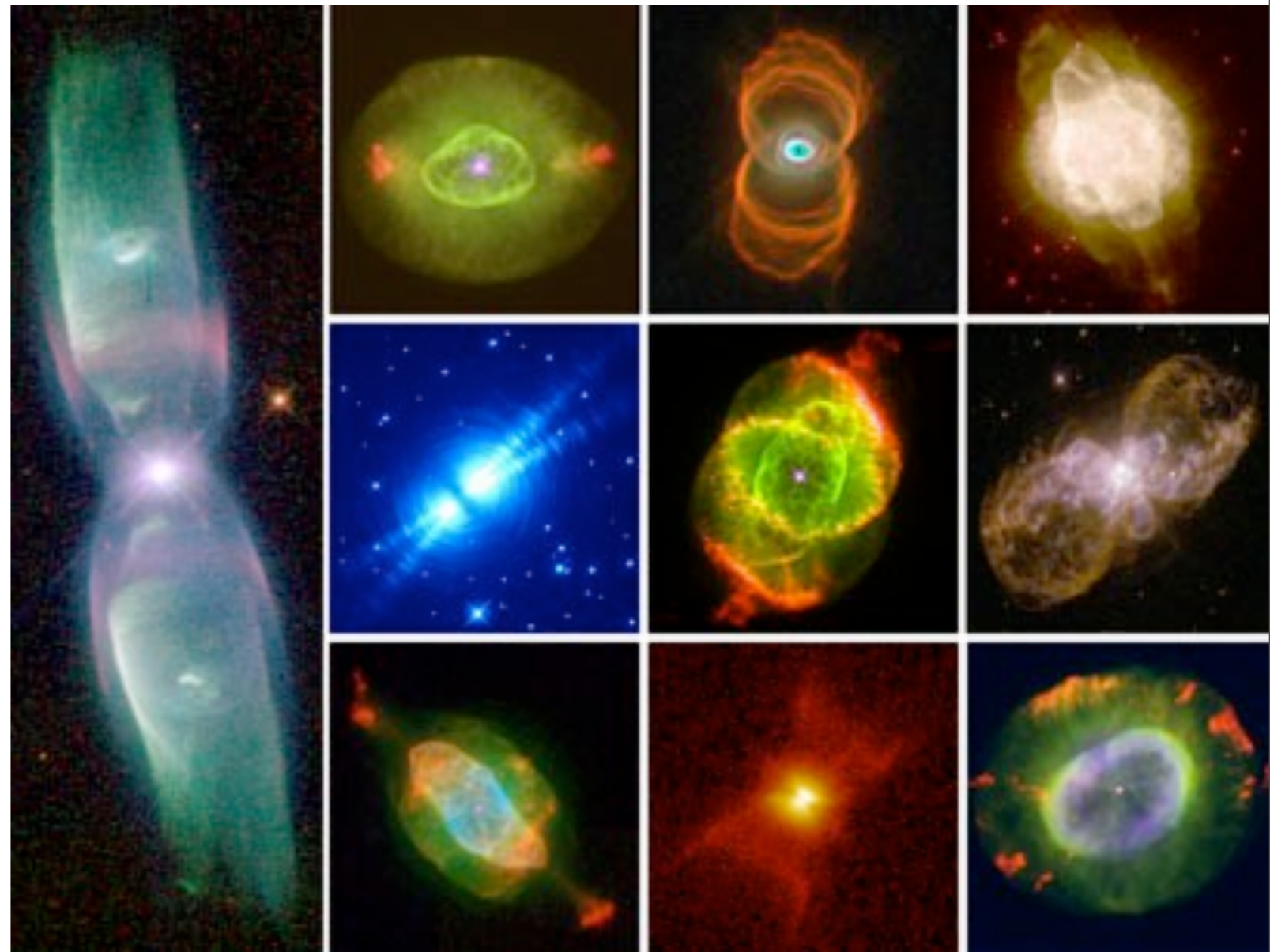
- 太陽の明るさの変化→昔地球は全球凍結(地球大気の成分は不変とする)
- 地球には数十億年前に暖かい時期があった
- 解決法
 - 昔は地球に温室効果ガスが多かった
 - メタン生成微生物の生存に必要なCO₂濃度には上限
 - 太陽は昔、今より重かった
 - 明るさは質量の~4乗に比例
 - 太陽風の質量放出率は現在の1,000倍必要

太陽の未来

- ~50億年後
 - 太陽の質量の~10%の水素がヘリウムになり、ヘリウムの中心核が収縮
 - 外層が膨張し赤色巨星に
 - 明るさ~2300倍、大きさ~170倍に
- 中心で $3\text{He} \Rightarrow \text{C}$ 、 $\text{C} + \text{He} \Rightarrow \text{O}$ という核反応が進行

惑星状星雲に (さらに~3500万年後)

- 中心核
 - 炭素と酸素でできた白色矮星
 - 大きさ~地球
 - 質量~太陽の半分
- 外層は放出
 - 白色矮星からの紫外線を吸収再放射する



NASA

恒星とその進化

恒星

- ✧ Fixed starの訳語
- ✧ 遠くにある、太陽と同じ機構で輝く星
- ✧ 固有運動: 視線に垂直な方向の運動
 - ✧ 銀河系のサイズ $\sim 3 \times 10^{17}$ km
 - ✧ 星の速度 $\sim 200 \text{ km s}^{-1}$
 - ✧ 一年で動く角度 $\sim 200 \times (3.2 \times 10^7) / (3 \times 10^{17}) \times 180 \times 3600 / \pi \sim 0.0044''$
 - ✧ 位置天文観測の精度 $\sim 0.001''$

星の基本的量

- 明るさ
 - 光
 - スペクトル
 - 光度
- 分類
- 化学組成
- 距離
- 運動
 - 固有運動
 - 視線速度

明るさ

- 等級
 - 全天で最も明るい星：1等星
 - 肉眼で見える最も暗い星：6等星
 - 5等級の差=100倍→1等級の差= $100^{1/5} \sim 2.512$ 倍
 - 太陽の明るさ=-27等
 - ハッブル望遠鏡の限界等級 $\sim +30$ 等

- 絶対等級：天体を10 pc(約32.6光年)に置いた時の等級
- 距離 d にある天体の見かけの明るさ m と絶対等級 M の関係： $m=M+5 \log_{10}(d/10 \text{ pc})$
- $m-M$ ：距離指数(distance modulus)

星のスペクトル

- 分光観測
 - プリズム、回折格子→波長ごとの強度
 - 表面温度、密度、化学組成
- 連続スペクトル
 - 黒体放射
- 光度
 - $L=4\pi R^2\sigma T_{\text{eff}}^4$ ：有効温度

黒体放射

- 不確定性原理
 - 1次元 $dpdx > h$, $h=1$ 量子状態
 - $dpdx/h \rightarrow$ 量子状態の数
 - 3次元 $h^3=1$ 量子状態
 - $dp_x dp_y dp_z dx dy dz / h^3 = 4 \pi p^2 dp dV / h^3 \rightarrow$ 量子状態の数
 - 光子: $p = h \nu / c \rightarrow$ 量子状態の数 $= 2 \times 4 \pi \nu^2 d\nu dV / c^3$

- それぞれの量子状態(ν)に n 個の光子
- エネルギー $E = nh\nu$, 確率 $\propto \exp(-nh\nu/kT)$
- 平均エネルギー

$$\bar{E} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} nh\nu \exp\left(-\frac{nh\nu}{kT}\right)}{\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{nh\nu}{kT}\right)} = \frac{\partial}{\partial\left(\frac{1}{kT}\right)} \ln\left(\sum_{n=0}^{\infty} \exp\left(-\frac{nh\nu}{kT}\right)\right) = \frac{\partial}{\partial\left(\frac{1}{kT}\right)} \left(1 - \exp\left(-\frac{h\nu}{kT}\right)\right)^{-1} = \frac{h\nu}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

- 光子のエネルギー分布

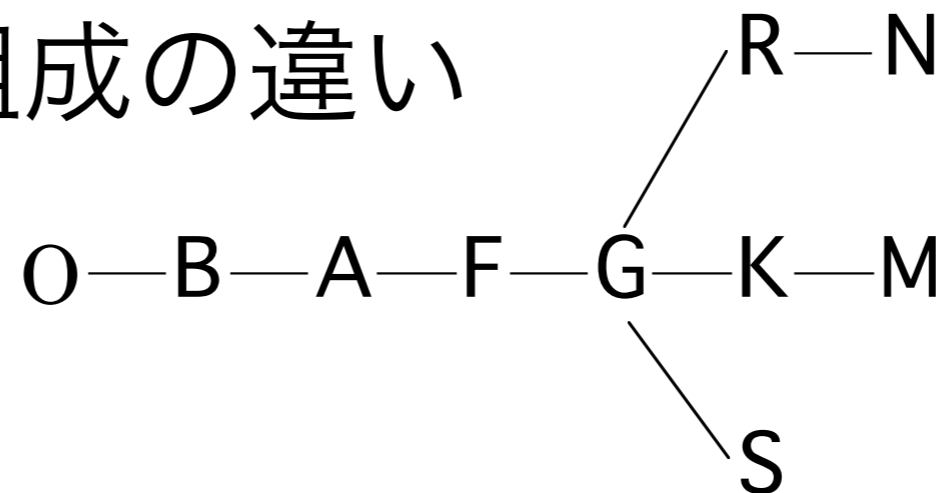
$$u_{\nu}(T)d\nu dV = \frac{2 \times 4\pi\nu^2}{c^3} E d\nu dV = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{d\nu dV}{\exp\left(\frac{h\nu}{kT}\right) - 1}$$

黒体放射の続き

- $h\nu \ll kT$, $B_\nu(T) = \frac{2\pi\nu^2 kT}{c^2}$ $B_\nu(T) = \frac{c}{4} u_\nu(T)$
- $h\nu \gg kT$, $B_\nu(T) = \frac{2\pi h \nu^3}{c^2} \exp(-h\nu/kT)$
- 放射エネルギー流量
$$B(T) = \int_0^\infty d\nu B_\nu(T) = \frac{2\pi^5 k^4}{15c^2 h^3} T^4 = \sigma T^4$$
- スペクトルの極大波長
 - $\lambda_{\max} = 0.289 \text{ cm}/T$
 - 太陽表面： $T=5800 \text{ K} \rightarrow \lambda_{\max} = 0.5 \mu$ (黄緑色)

分類

- スペクトル型
 - 吸収線：暗い縞
 - ハーバード分類：スペクトル線の見え方、温度の系列
 - 分岐：化学組成の違い



ハーバード分類

スペクトル型	温度	色	スペクトルの特徴
O	数万度	青白	電離ヘリウムの線
B	25,000-11,000 K	青白	水素と中性ヘリウムの線
A	11,000-7,500 K	白	水素のバルマー線
F	7,500-6,000 K	薄黄	水素のバルマー線
G	6,000-5,000 K	黄	水素のバルマー線+金属元素の線
K	5,000-3,600 K	橙	金属の吸収線が非常に強い
M	3,600 K 以下	赤	金属の吸収線+TiOなどの分子による吸収線

Spectral Sequence of Stars

400

500

600

700

nm

MK
Types

O5V

B1V

A1V

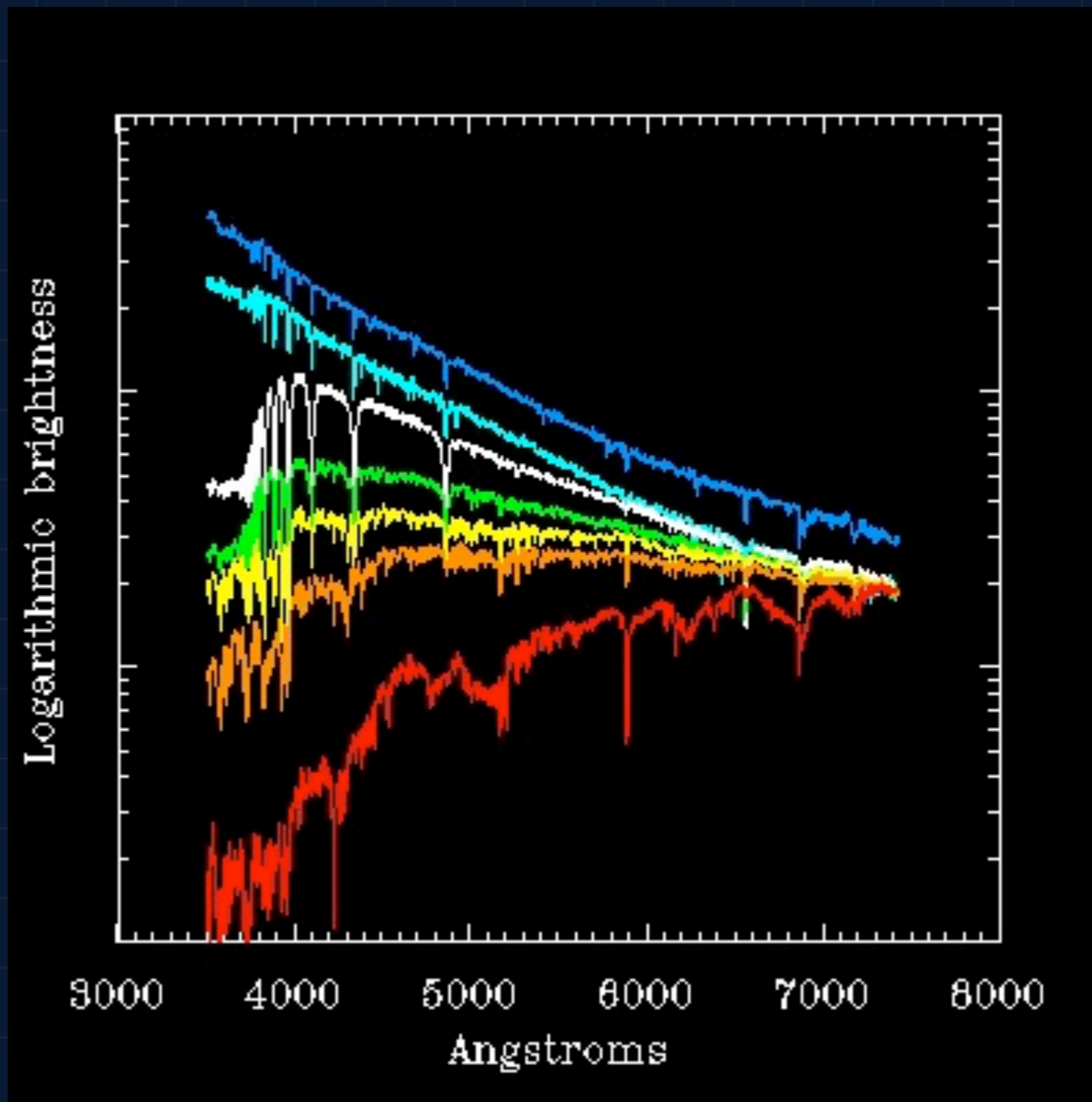
F3V

G2V

K0V

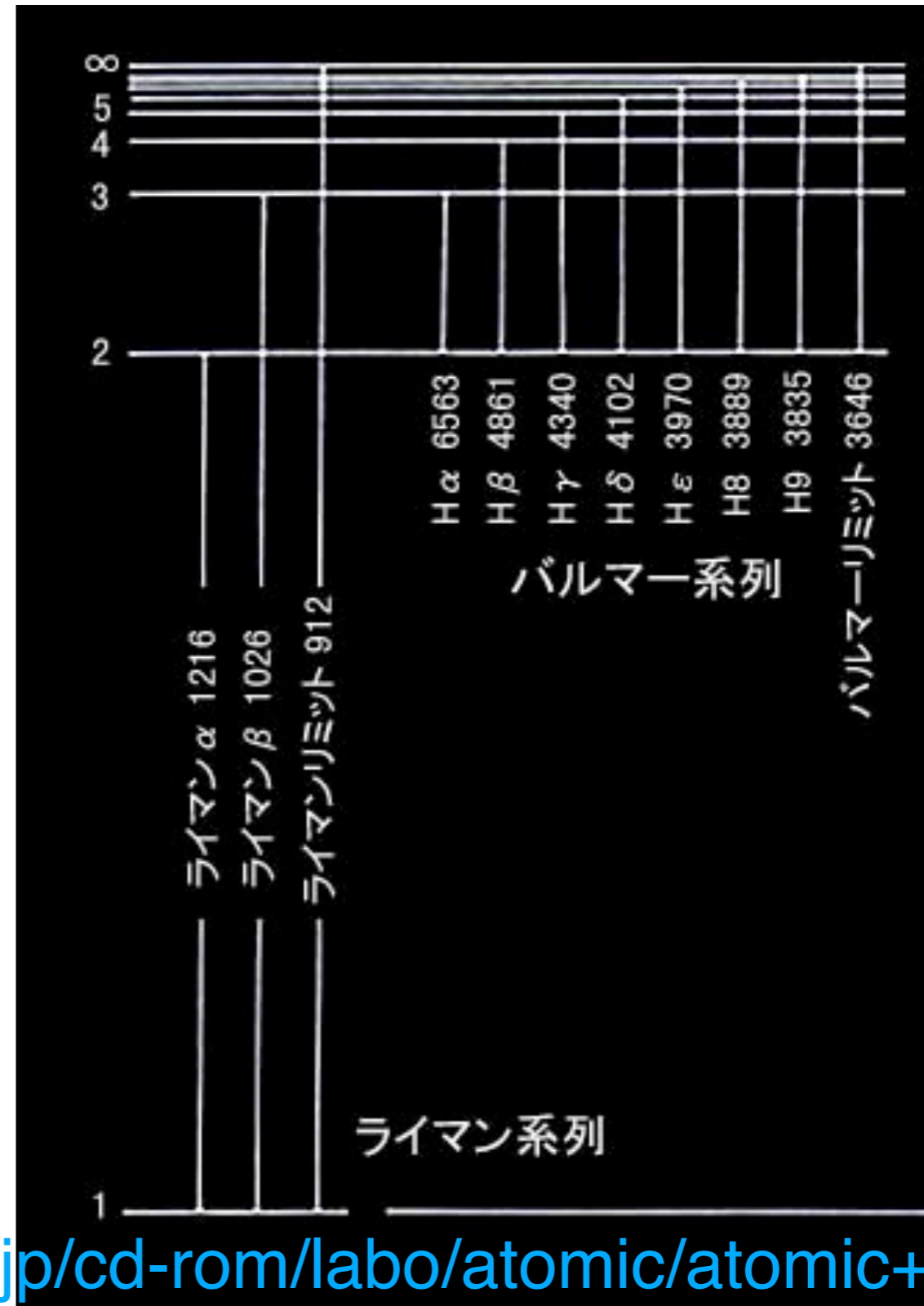
M0V





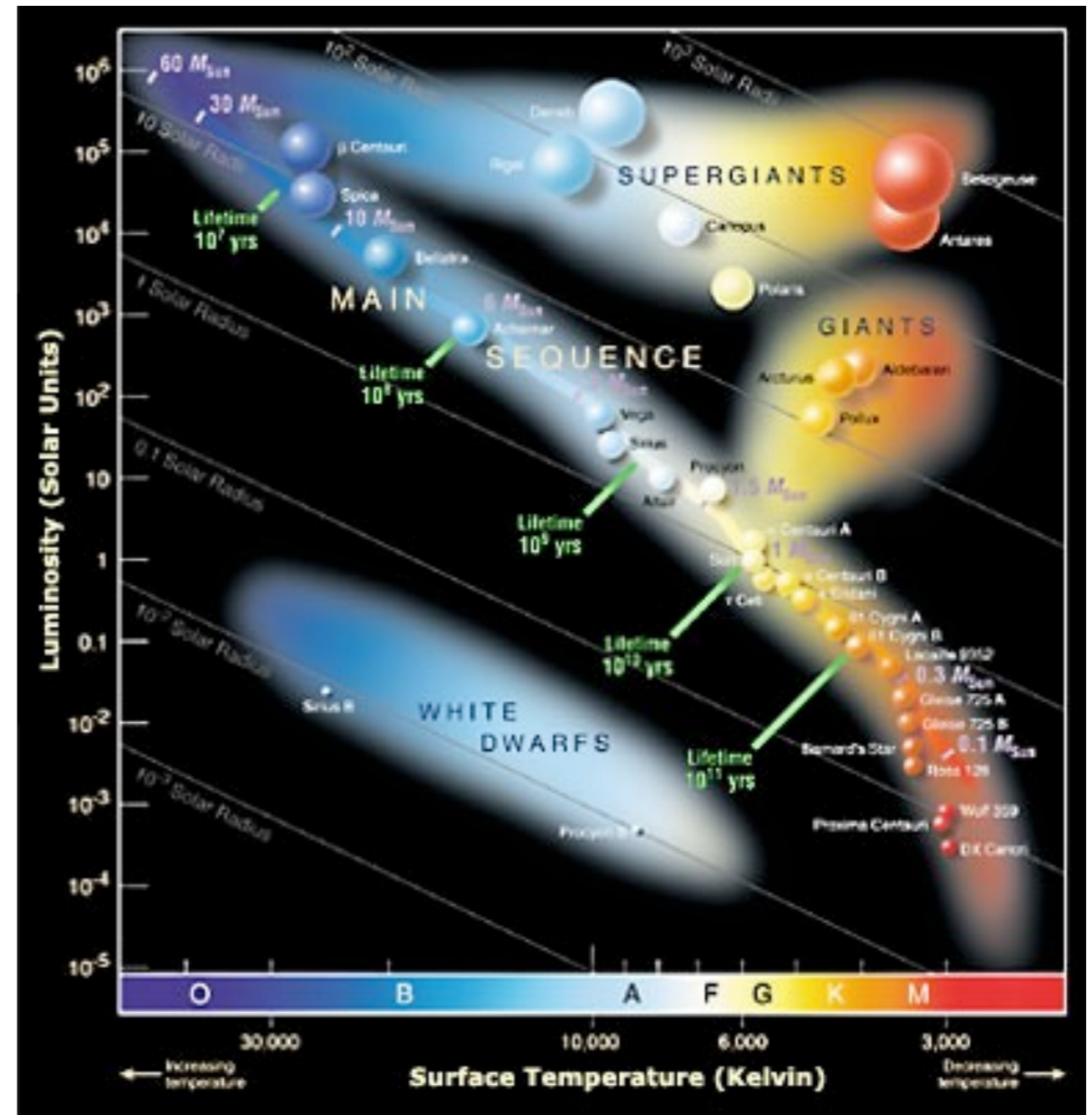
水素原子のエネルギー準位

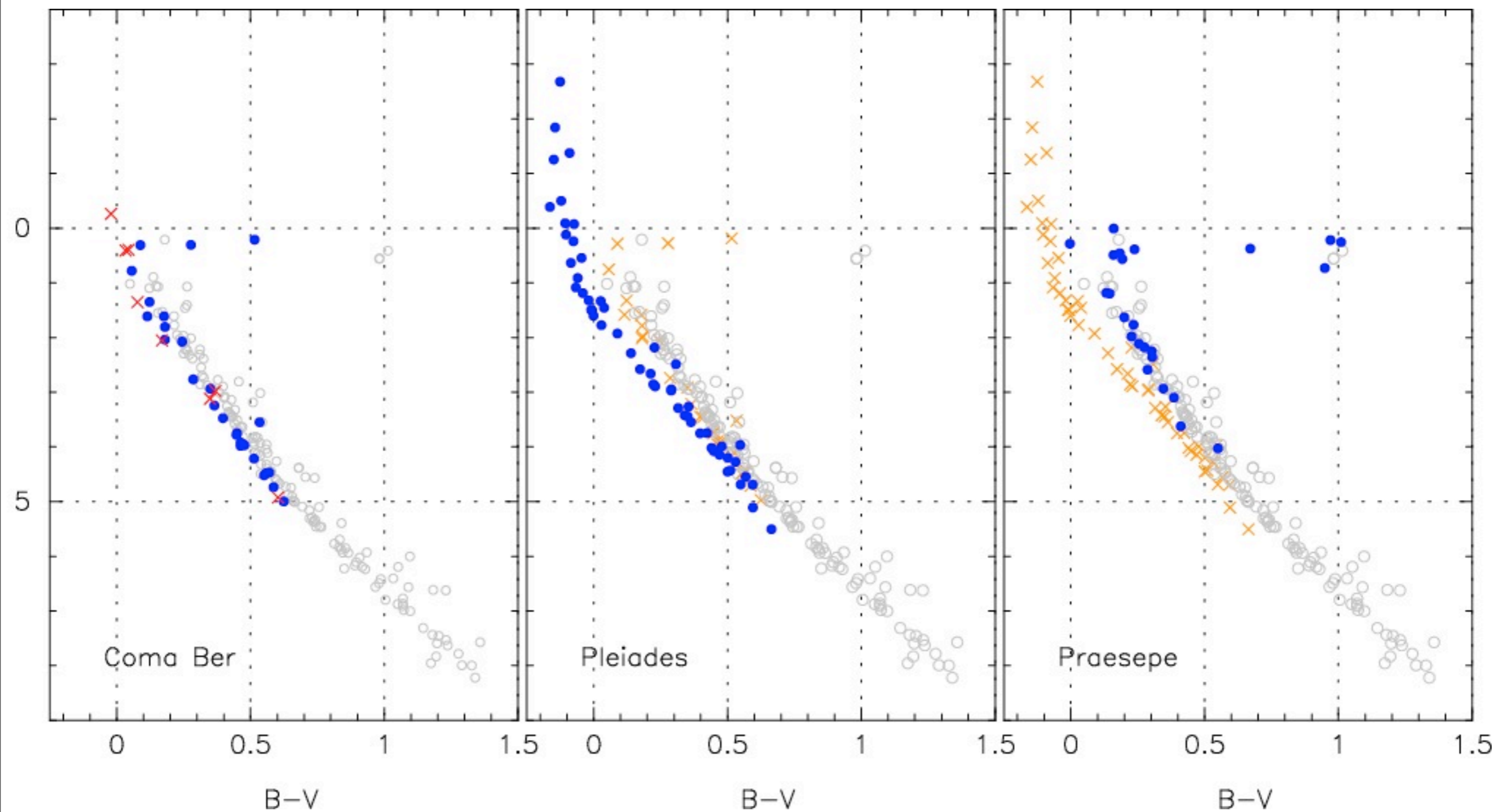
- 可視光→バルマー系列
- Boltzmann Distribution
 $P_n \propto \exp(-E_n/(kT))$
- 温度が高いと
 - P_2 が増加
 - P_1 減少



Hertzsprung-Russell Diagram

- 横軸：星の表面温度
- 縦軸：絶対等級

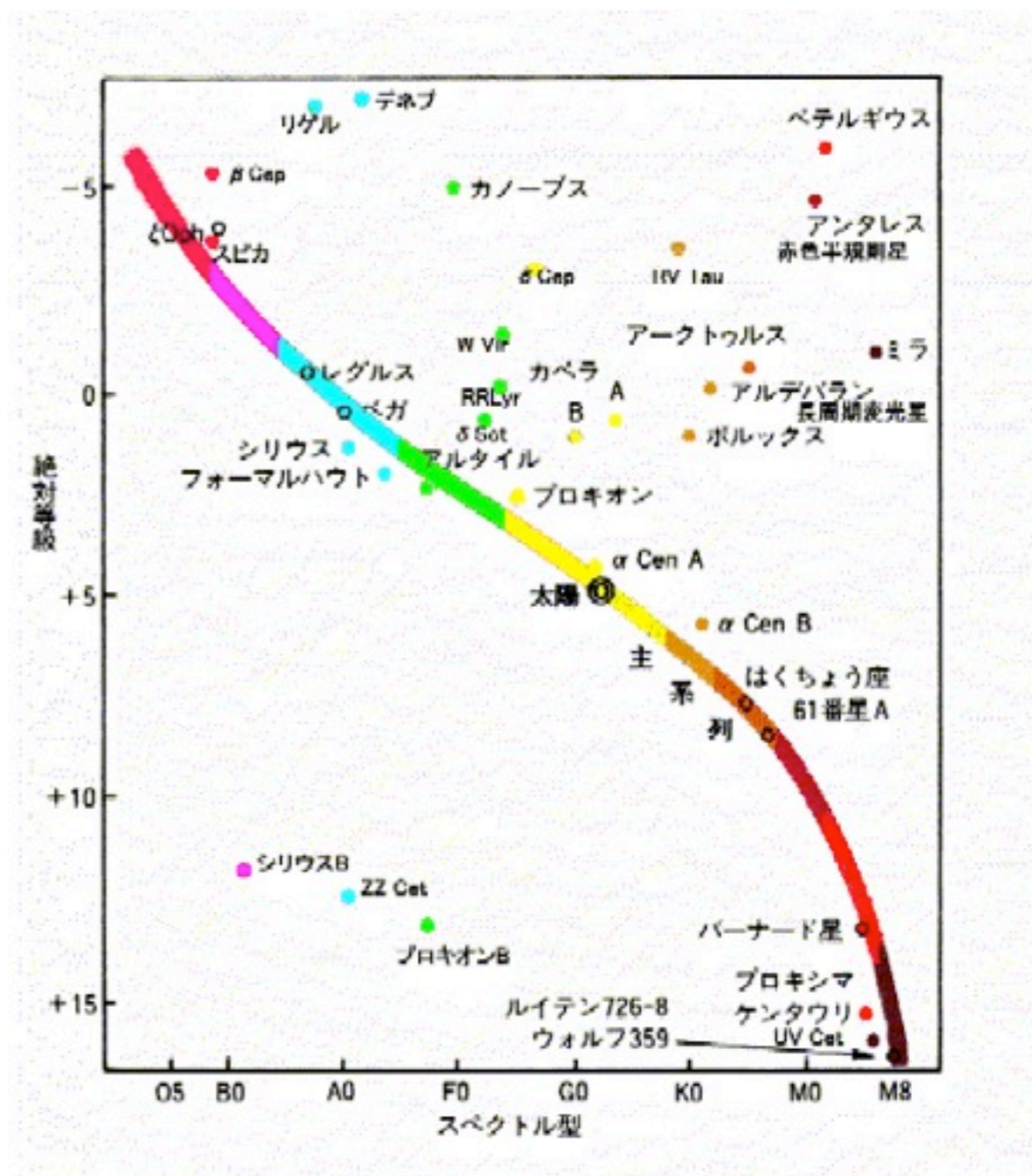




星団のH-R図

いろいろな恒星

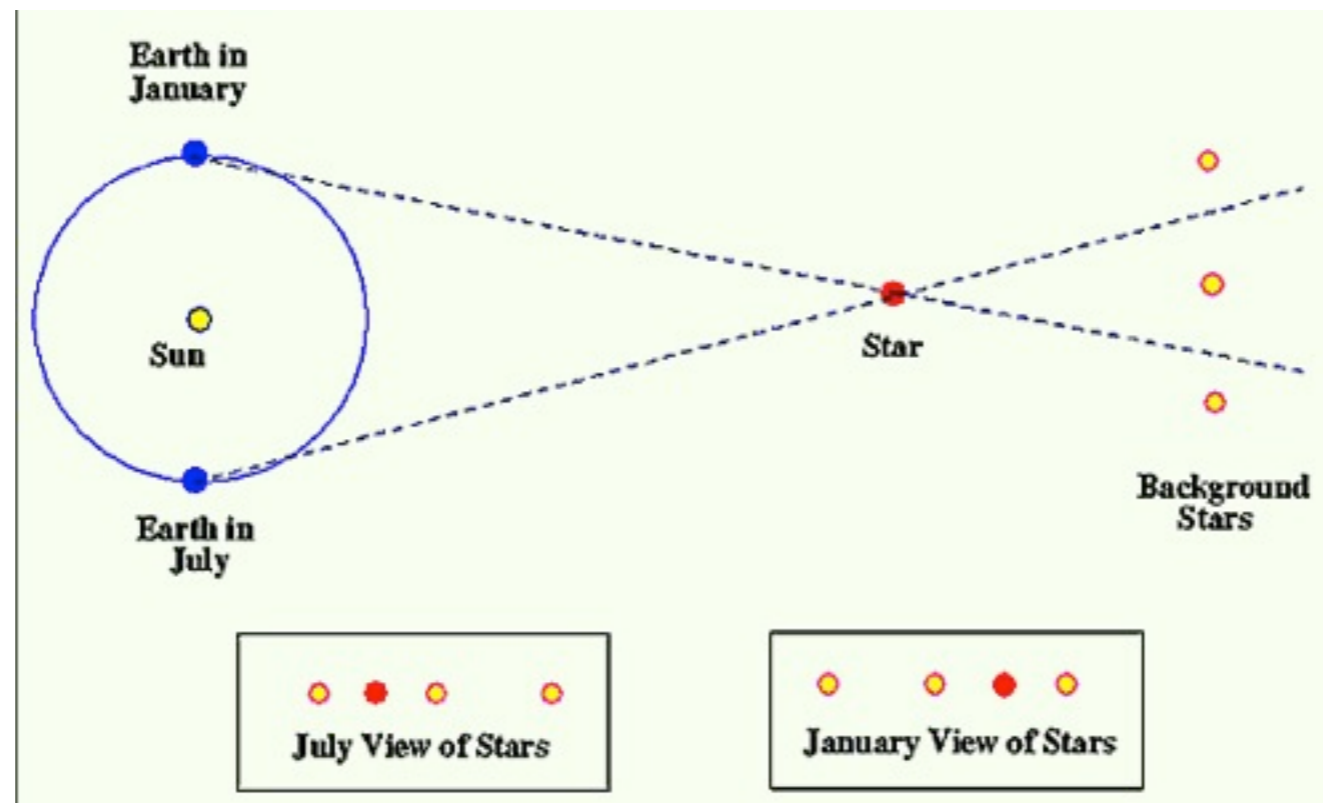
- ・星の活動性
- ・星風、質量放出
- ・フレア
- ・脈動変光星
- ・激変星
- ・新星



<http://www.jupiter.sannet.ne.jp/funada/nhk/type/>

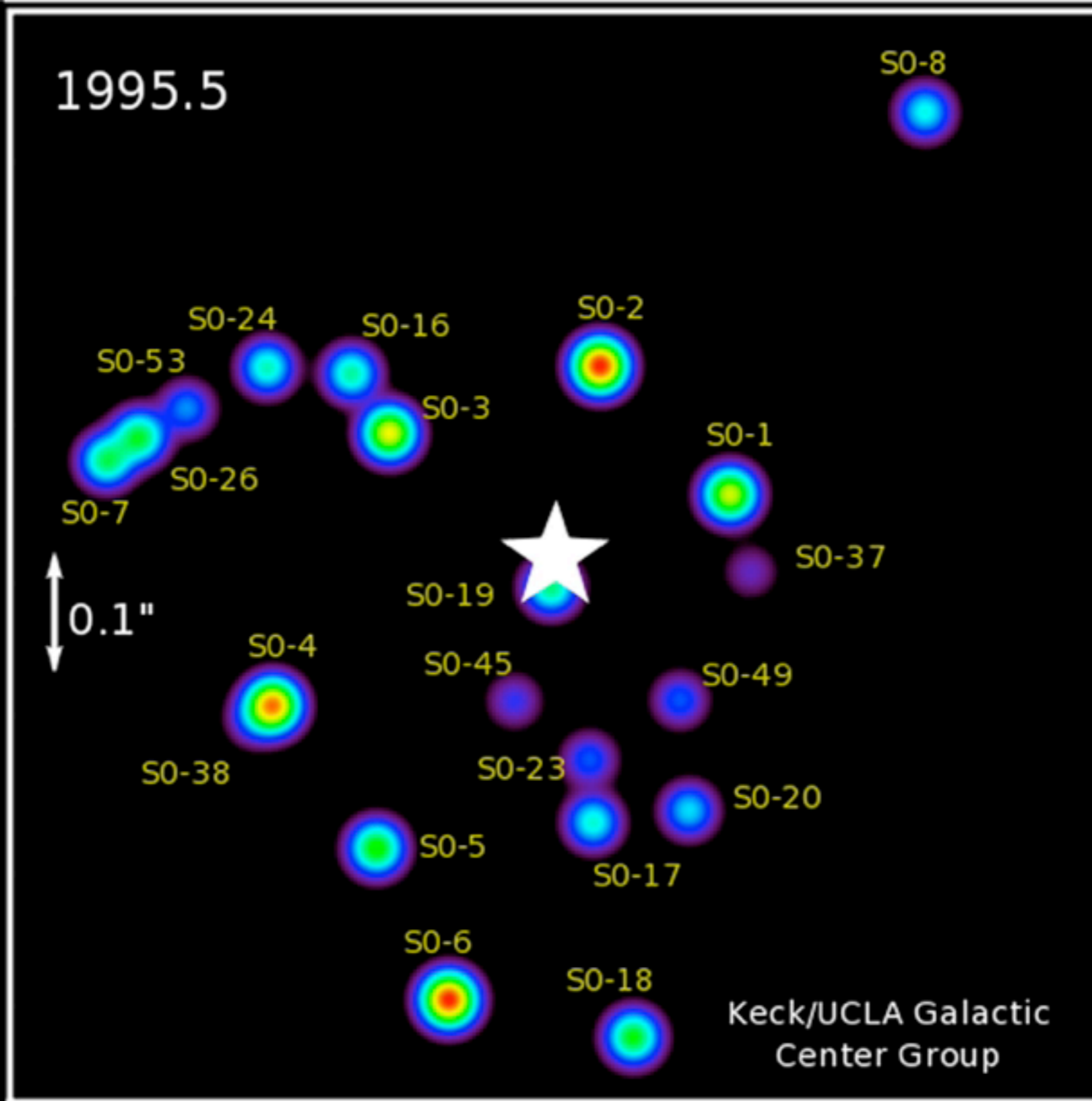
天体までの距離

- 近傍の星：地球軌道を基線にした三角測量
 - 年周視差：星が太陽と地球を見込む角度（秒）
 - 年周視差の逆数=距離(pc), $1 \text{ pc} = 3.26 \text{ ly} = 3.1 \times 10^{13} \text{ km}$
 - 例えば精度= $\pm 0.01'' \rightarrow 100 \text{ pc}$
- Distance ladder：絶対等級が判っている天体を使う



固有運動

- 視線に垂直な方向の運動
- 1年あたりに天球上を移動する角度
- 測定：数年から数十年間隔を置いて同じ視野の星の位置を測定



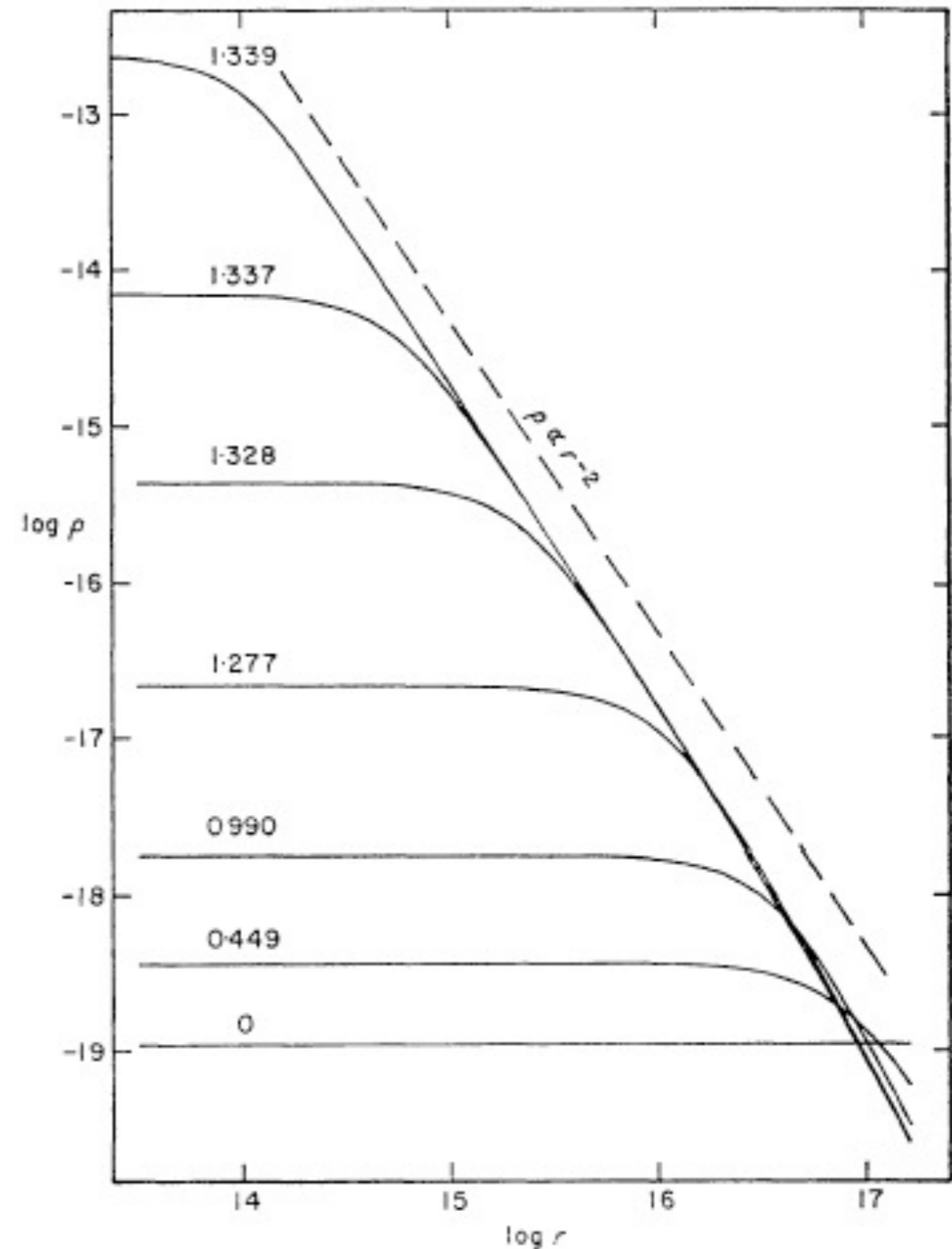
銀河系中心の星の固有運動

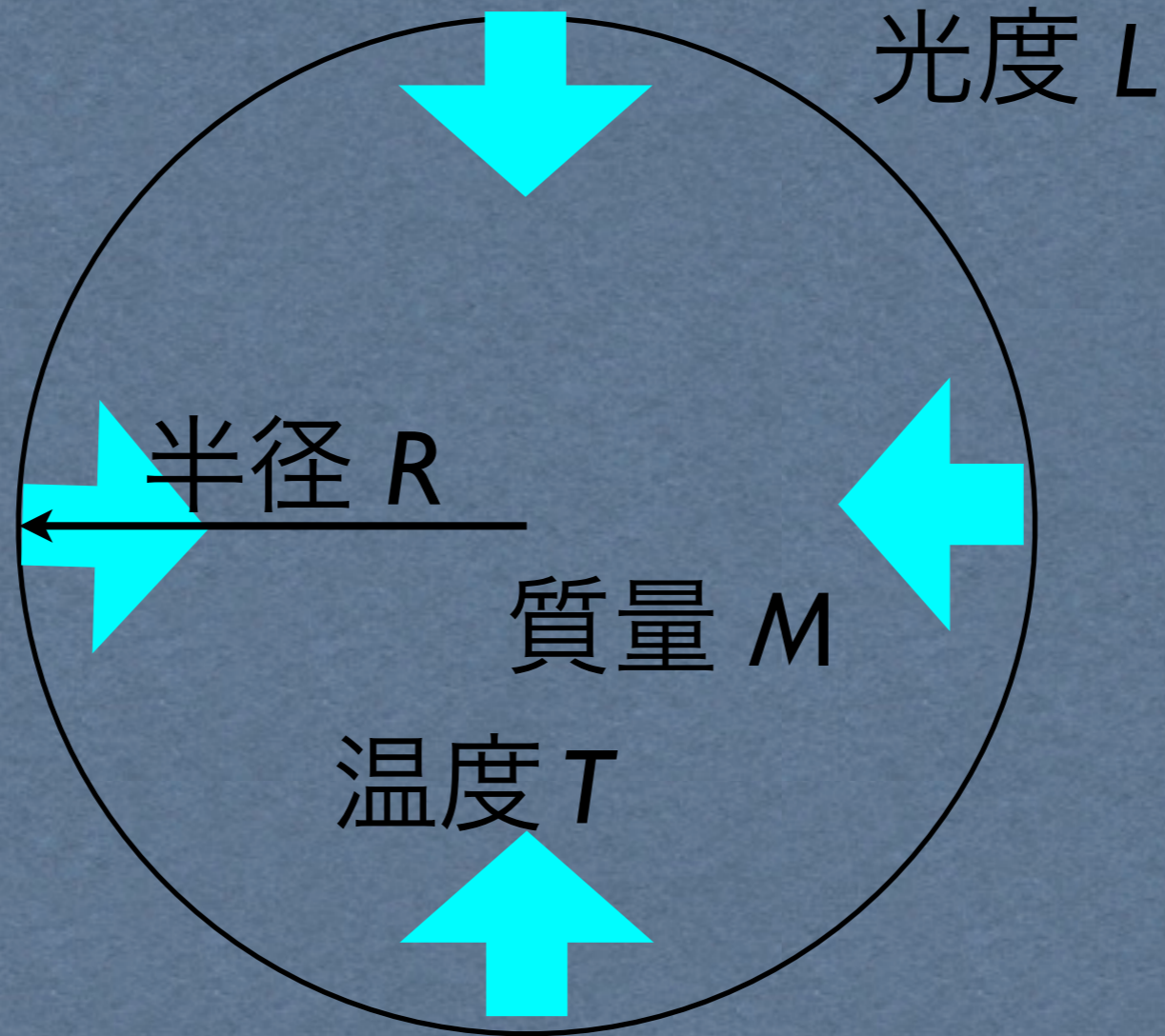
- 銀河中心に重力源
- 可視光では見えない
- ブラックホール
- 質量は太陽の約370万倍

星形成から主系列星 へ

星の誕生

- 星間雲の収縮
 - 自由落下の時間 < 音速が横切る時間
 - 自己重力エネルギー > ガスの運動エネルギー
- Kelvin-Helmholtz contraction
 - $t \sim GM^2/(RL)$





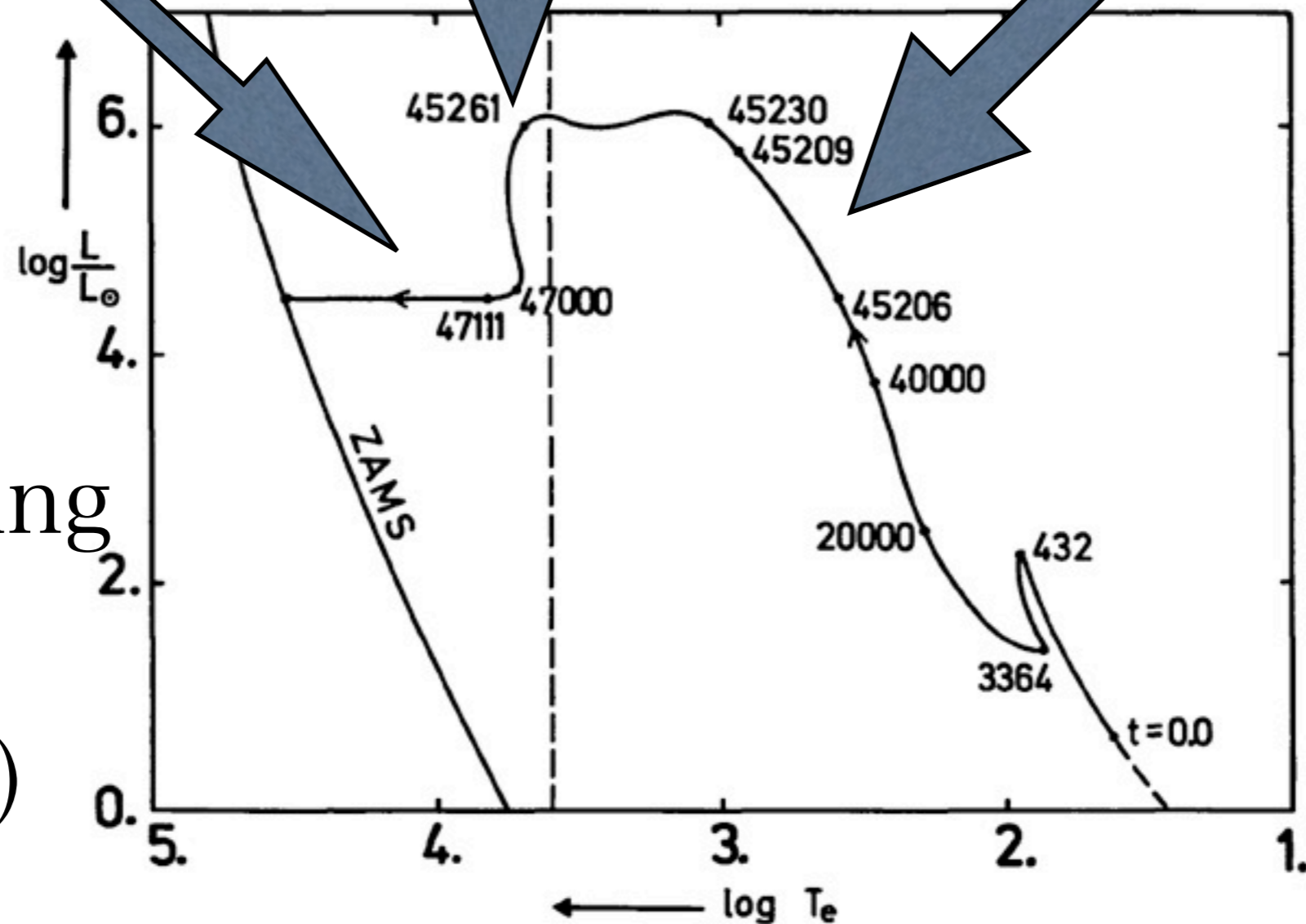
$$\sqrt{\frac{R^3}{GM}} < \frac{R}{C_s}, \quad C_s = \sqrt{\frac{kT}{m}}, \Rightarrow R > \sqrt{\frac{3kT}{4\pi G \rho m}} \equiv R_J$$

Hayashi track

Henyeey track

Kelvin-Helmholz 収縮
重力エネルギー \Rightarrow 放射

H-R図
(Hertzsprung
-Russell
diagram)



Kelvin-Helmholz 収縮

- 重力収縮 \Rightarrow ガスの温度上昇(断熱圧縮) \Rightarrow 熱輸送(表面からの放射による冷却) \Rightarrow ガス圧の減少 \Rightarrow 重力収縮
- 熱輸送の時間で進化が決まる

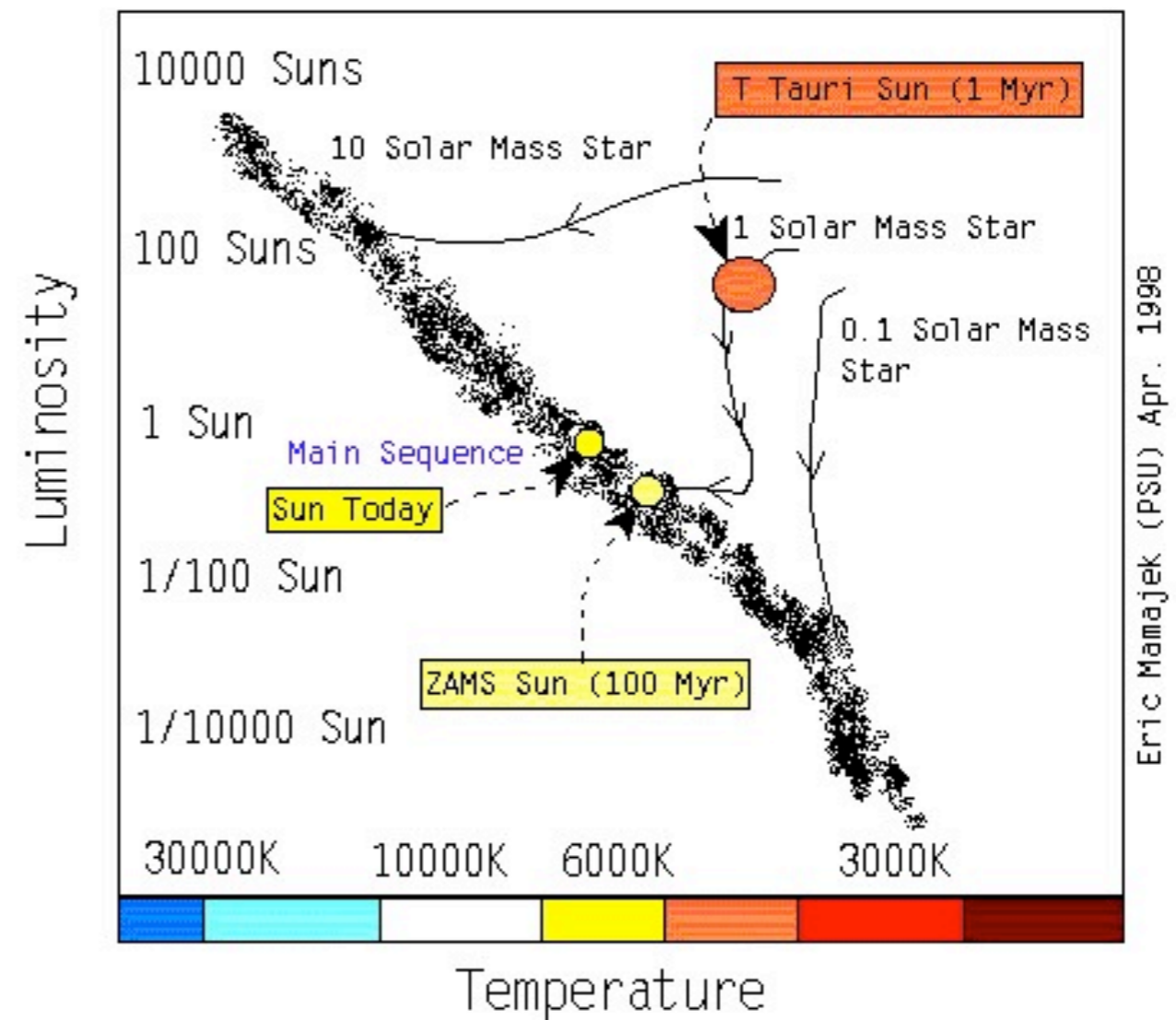
対流平衡

- 星全体が対流
- HR図を上から下へほぼ垂直に進化
 - これ以上表面温度が低くならない限界

Henry track

Hertzsprung-Russell Diagram

- 輻射平衡
- HR図を水平に右から左へ進化
- 主系列へ



主系列星

- 中心温度 1000万度以上
 - 太陽の0.08倍以上の星(核融合反応に点火するための条件)
- 水素の核融合反応
- HR図上の位置の違い⇒質量の違い
- 質量光度関係: $L \propto M^a$, $a=3-4$
- 主系列星の寿命 $\propto M/L \propto M^{1-a}$
- 太陽は100億年、 $10 M_{\odot}$ の星⇒1000万年

星が光る理由

- 自己重力とガスの圧力勾配の釣り合い
 - 中心温度~1,000万度(太陽: 1,500万 K)
- 宇宙空間は低温 3 K
- 熱は高温部から低温部へ流れる
- 表面で熱エネルギーは可視光として流出
- 光り続けるにはエネルギー源が必要

恒星内部構造

- 静水圧平衡

- 重力=圧力勾配

$$\frac{\partial M_r}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho,$$

- 熱平衡

- 発生する熱=運ばれる熱
 - 運ばれ方：放射、対流

$$\frac{\partial P}{\partial r} = -\frac{GM_r \rho}{r^2},$$

- 4つの微分方程式

- 境界条件
 - 状態方程式 $P = P(\rho, T)$
 - 核反応率 ε
 - 不透明度 κ

$$L_r = -\frac{16\pi a c r^2 T^3}{3\kappa \rho} \frac{\partial T}{\partial r},$$

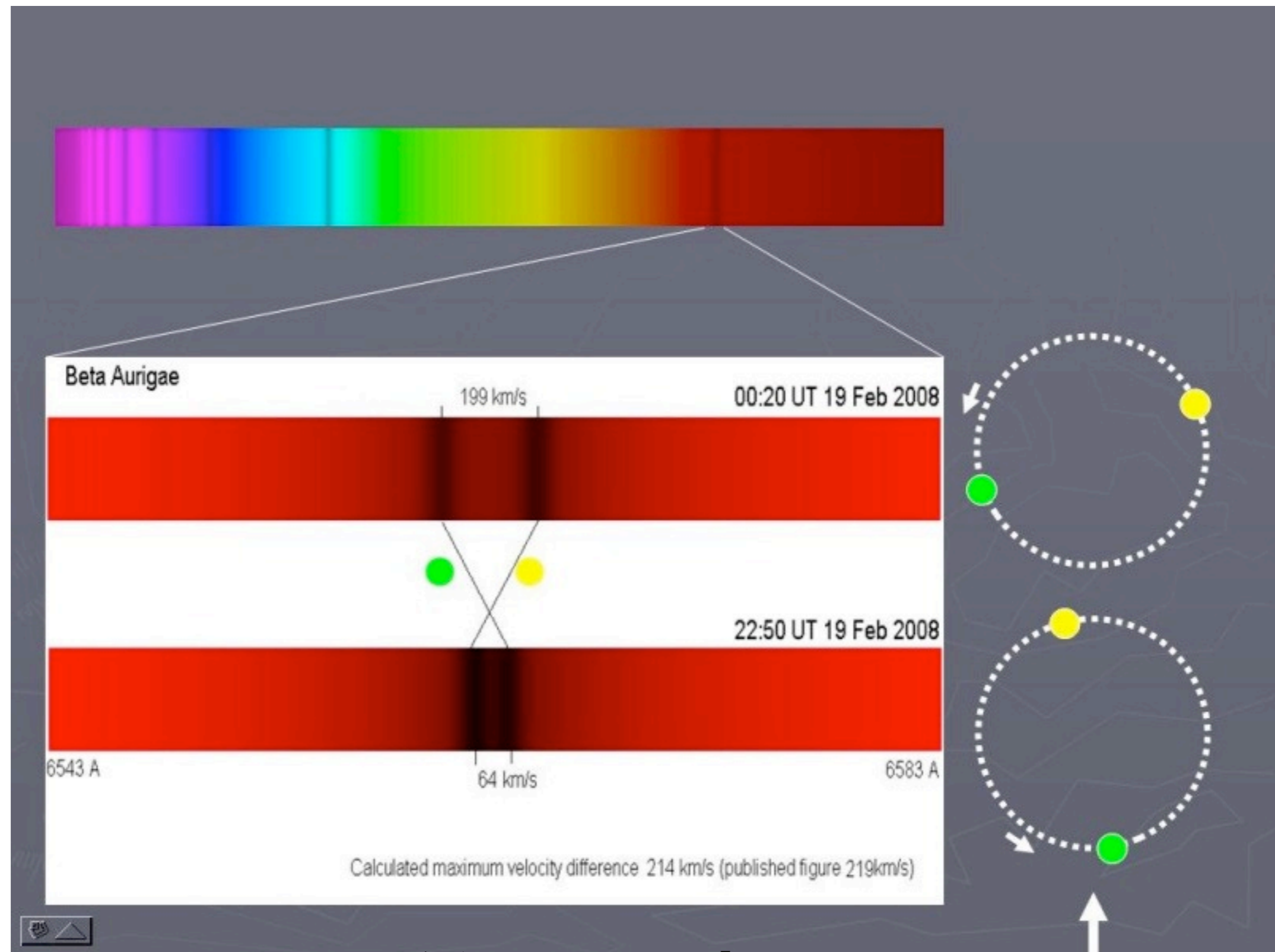
$$\frac{\partial L_r}{\partial r} = 4\pi r^2 \rho \varepsilon.$$

放射層と対流層

- 放射層
 - 放射によるエネルギー輸送
 - 温度が高い層
- 対流層
 - 対流によるエネルギー輸送
 - 温度が低い層、不透明度が高い層

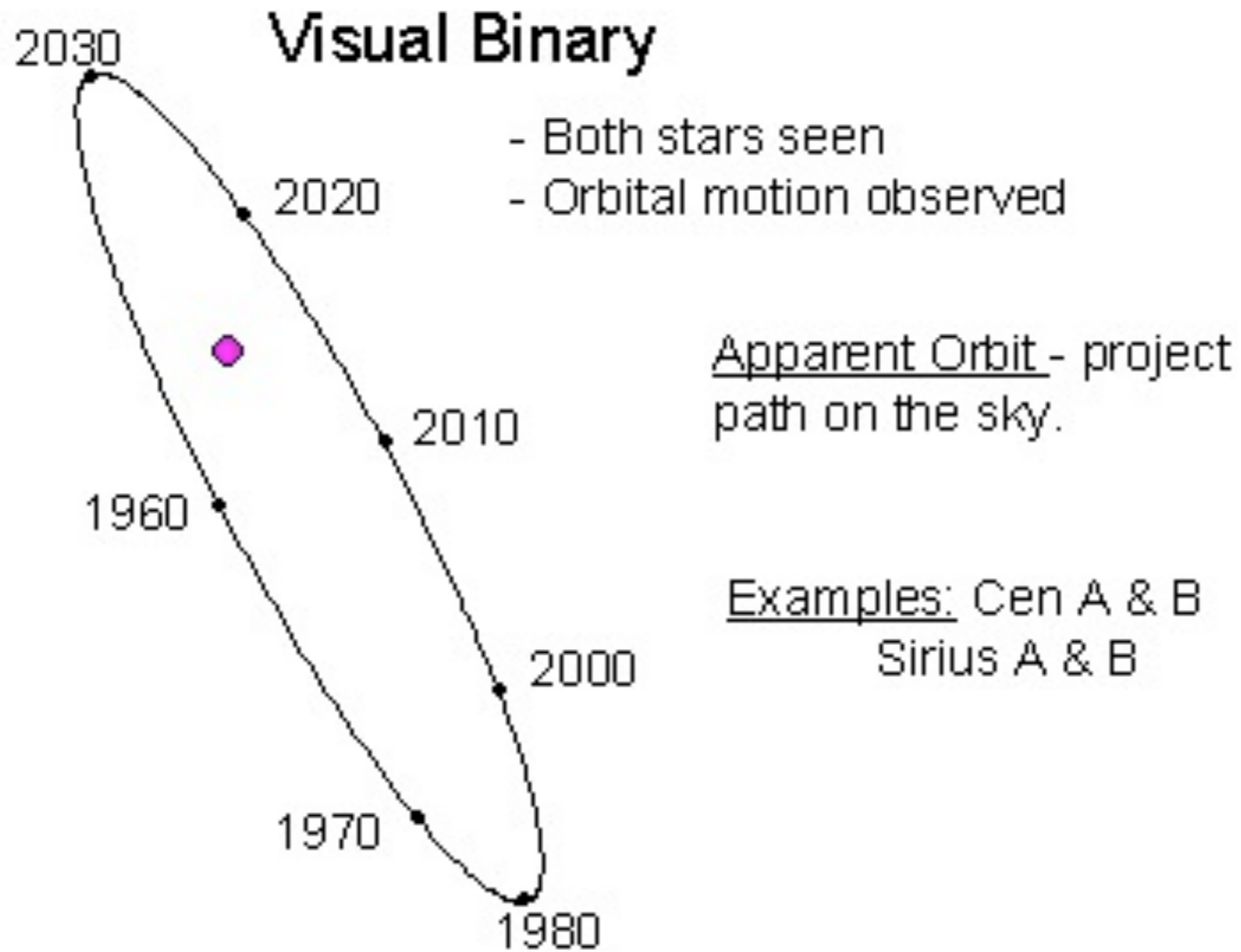
放射層と対流層

- 太陽
 - 外層=表面对流層
 - 内側=放射層
- 1.5太陽質量より重い星
 - 中心付近に対流層(CNO cycle)
 - 表面对流層は少ない
- 赤色巨星
 - 表面对流層



分光連星

実視連星



<http://instruct1.cit.cornell.edu/courses/astro101/lec16.htm>

NPOI Observations of Mizar A
(ξ^1 Ursa Majoris)

Orbital Phase: 000°

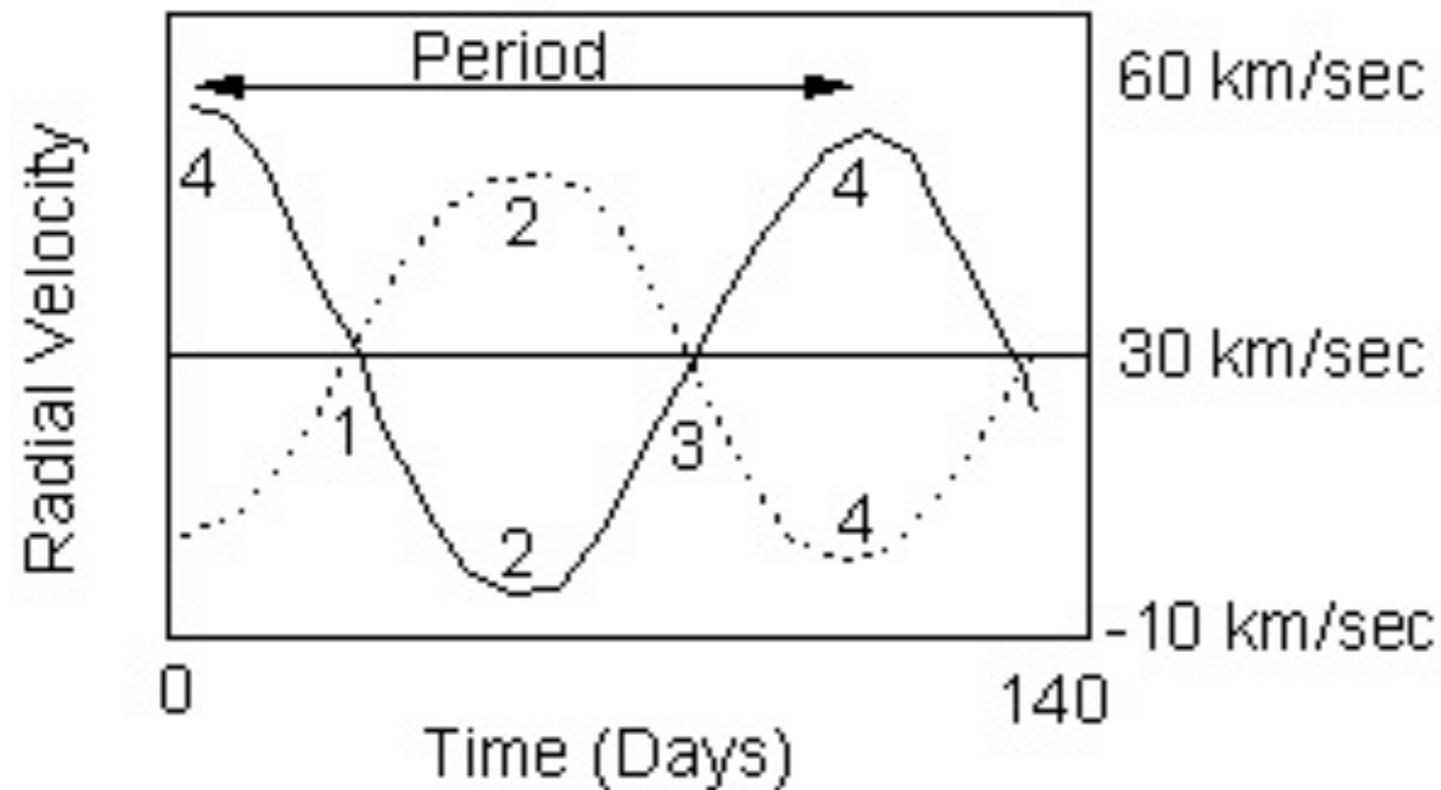
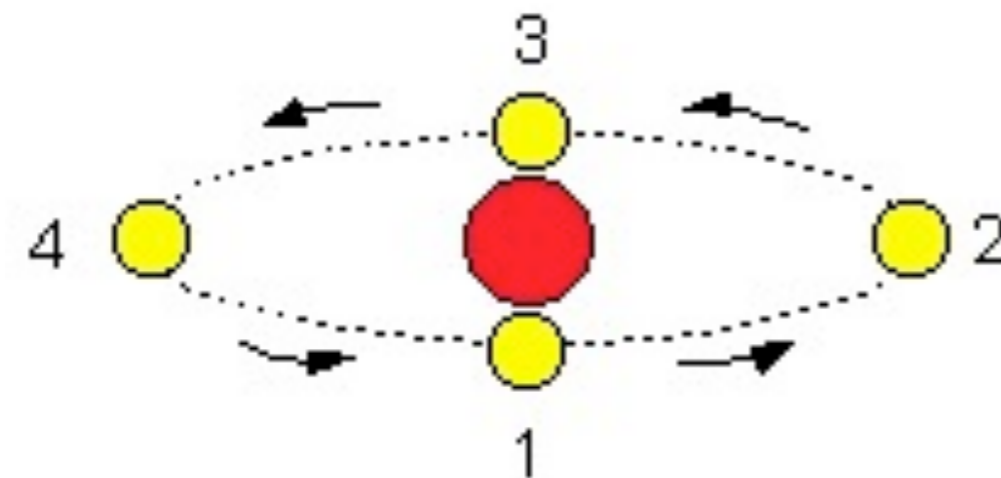
Mizar, 88 light years distant, is the middle star in the handle of the Big Dipper. It was the first binary star system to be imaged with a telescope. Spectroscopic observations show periodic Doppler shifts in the spectra of Mizar A and B, indicating that they are each binary stars. But they were too close to be directly imaged - until 2 May 1996, when the NPOI produced the first image of Mizar A. That image was the highest angular resolution image ever made in optical astronomy. Since then, the NPOI has observed Mizar A in 23 different positions over half the binary orbit. These images have been combined here to make a movie of the orbit. As a reference point, one component has been fixed at the map center; in reality, the two stars are of comparable size and revolve about a common central position.

分光連星

Spectroscopic Binary

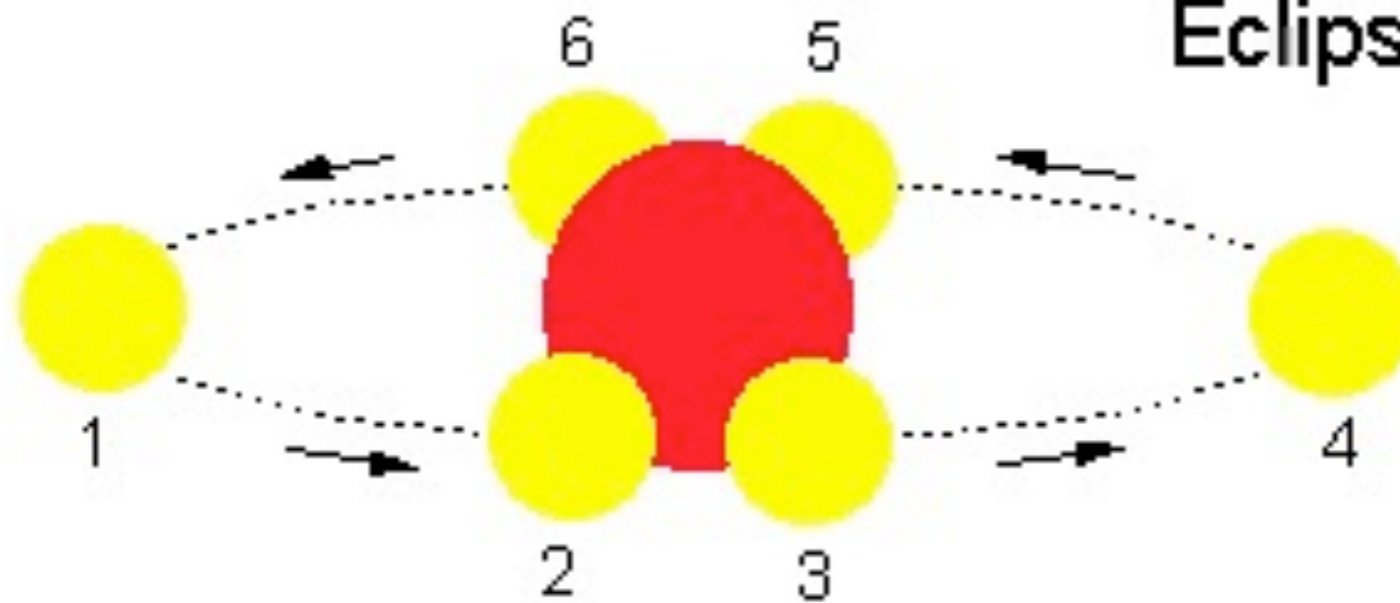
Doppler shift due to orbital motions.

Example: β Aurigae



食連星

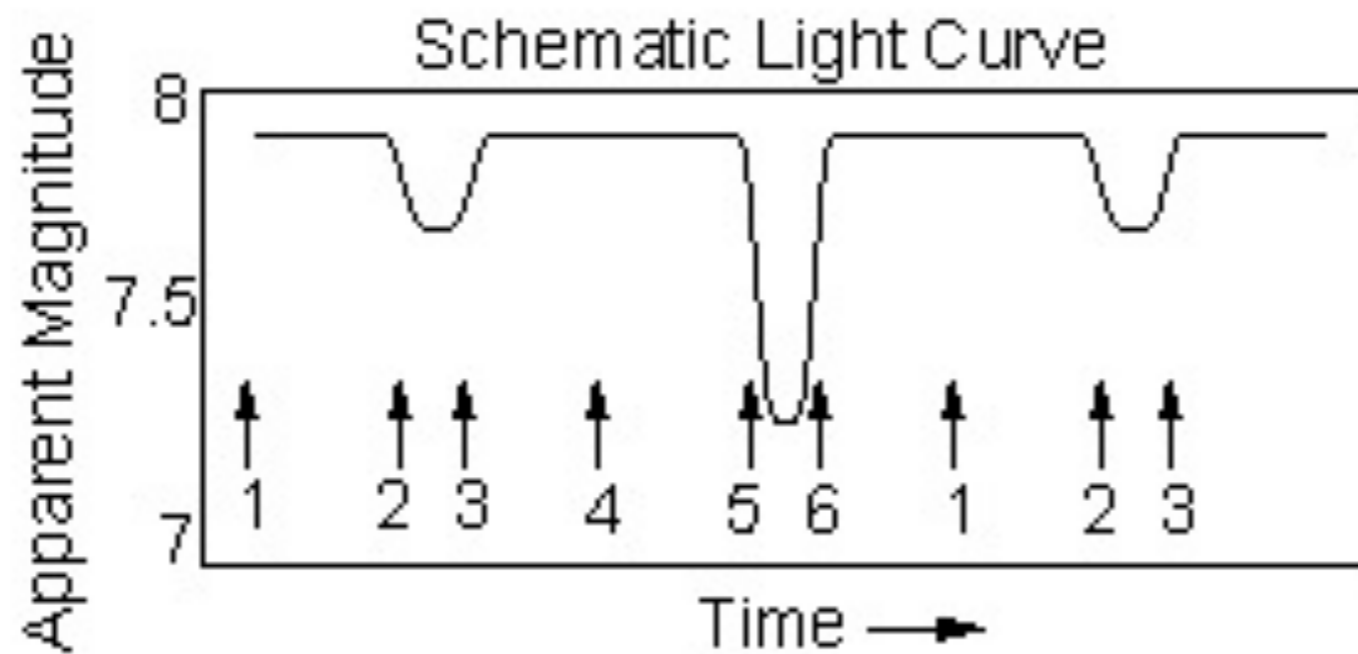
Eclipsing Binary



- Stars cross
in front of
one another

Examples:

Algol
 β Persei
 β Lyrae



周期

- 収縮膨張の時間

$$t = \left| \frac{r \partial t}{\partial r} \right| \sim \frac{1}{\sqrt{G\rho}} \sim \frac{R}{C_s}$$

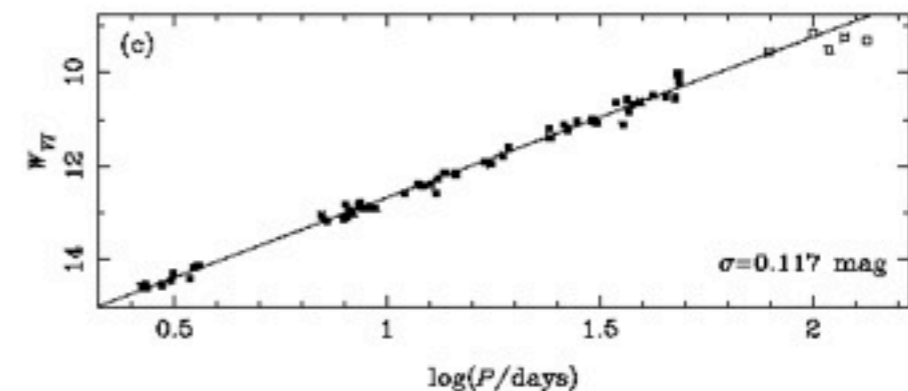
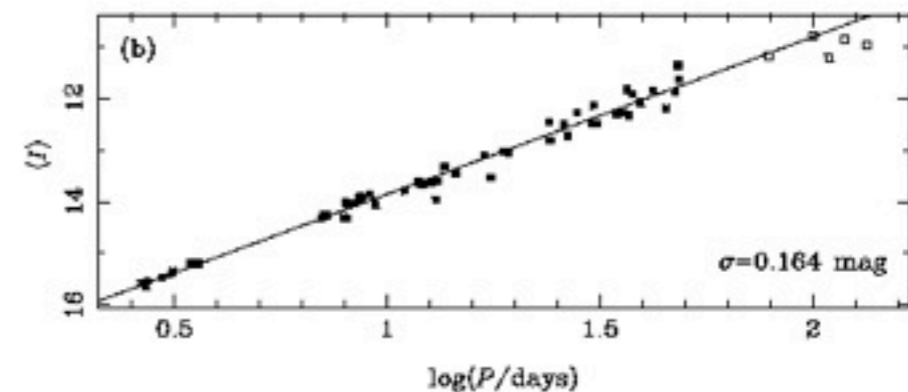
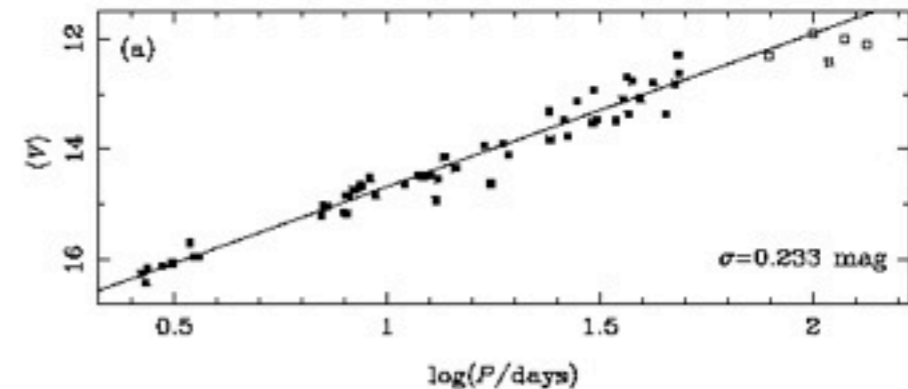
- 周期－光度関係

- マゼラン雲の変光星で発見

- $L = 4 \pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$

- 距離の指標

- 15 Mpc(4 億5千万光年
~ 4.5×10^{20} km)まで測れる

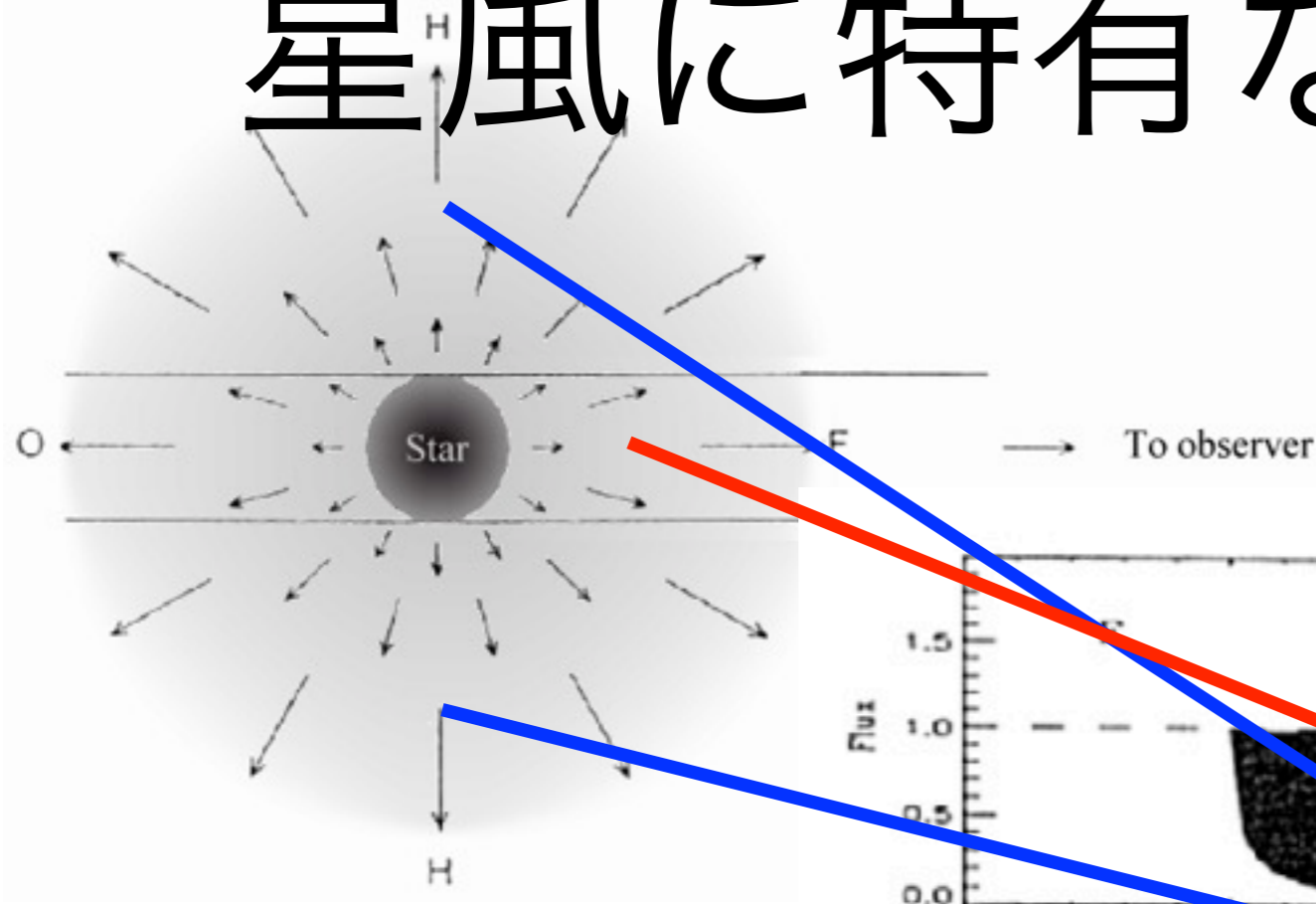


固有振動

- 運動方程式： $\rho \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial r} - \frac{GM\rho}{r^2}$
- 断熱収縮
 - 圧力 $\frac{\partial P}{\partial r} \propto \frac{\partial \rho^{5/3}}{\partial r} \propto r^{-6}$ (単原子理想気体)
 - 重力 $\frac{GM\rho}{r^2} \propto r^{-5}$
- 自己重力<圧力勾配⇒膨張⇒自己重力>圧力勾配⇒圧縮
- 圧力が復元力
- 膨張：青くて明るい、収縮：赤くて暗い
- 励起機構：He⁺⁺ イオン

- 高温になると
 - $\text{He}^+ \rightarrow \text{He}^{++} + \text{e}^-$
 - 自由電子の数が増えるので不透明に
 - より多くの光を吸収して高温に
 - 圧力増加→膨張

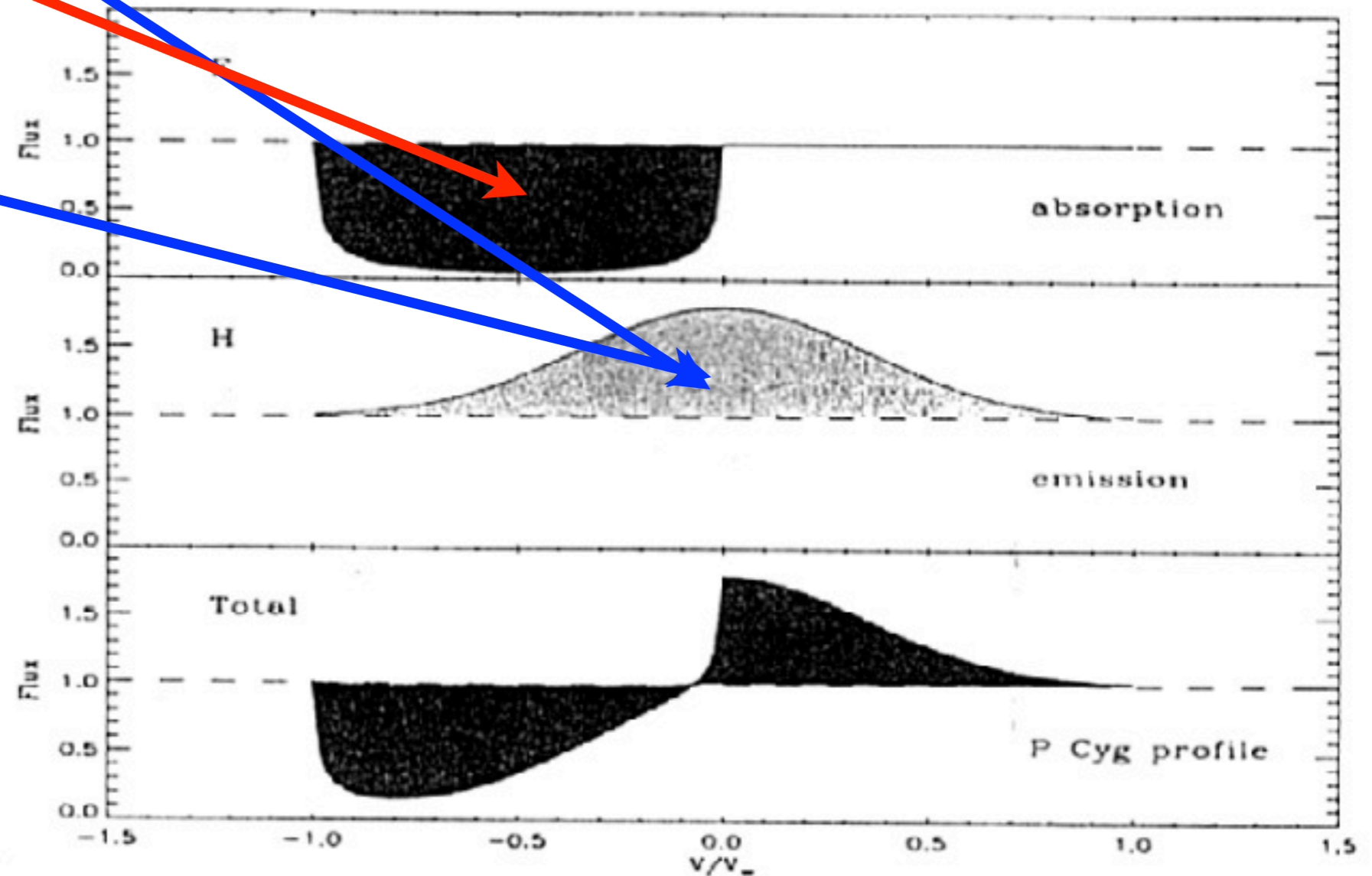
星風に特有なスペクトル



静止系: 輝線

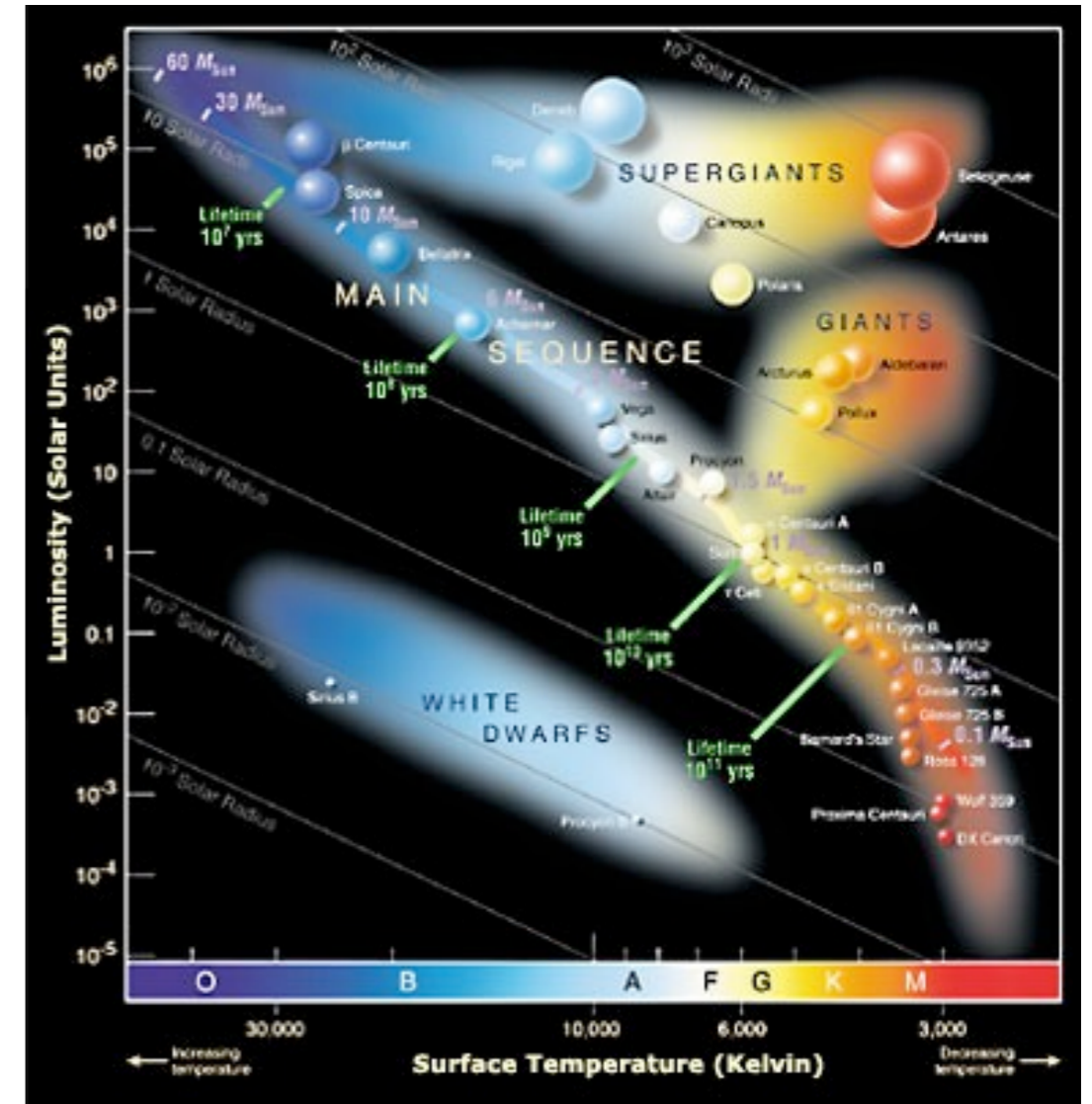
青方偏移: 吸収

線



青い星からの質量放出

- ・ 膨張速度: 1000~3000 km/s
- ・ 質量放出率: $10^{-8} \sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$
 - ・ 全放射光度と良い相関
- ・ X線放射 ($T > 10^6$ K)
 - ・ 恒星風が不安定?
 - ・ 磁気ループ?
- ・ 青い星 (早期型星)
 - ・ 光の圧力 > 重力
 - ・ 光子の運動量 = $h\nu/c$



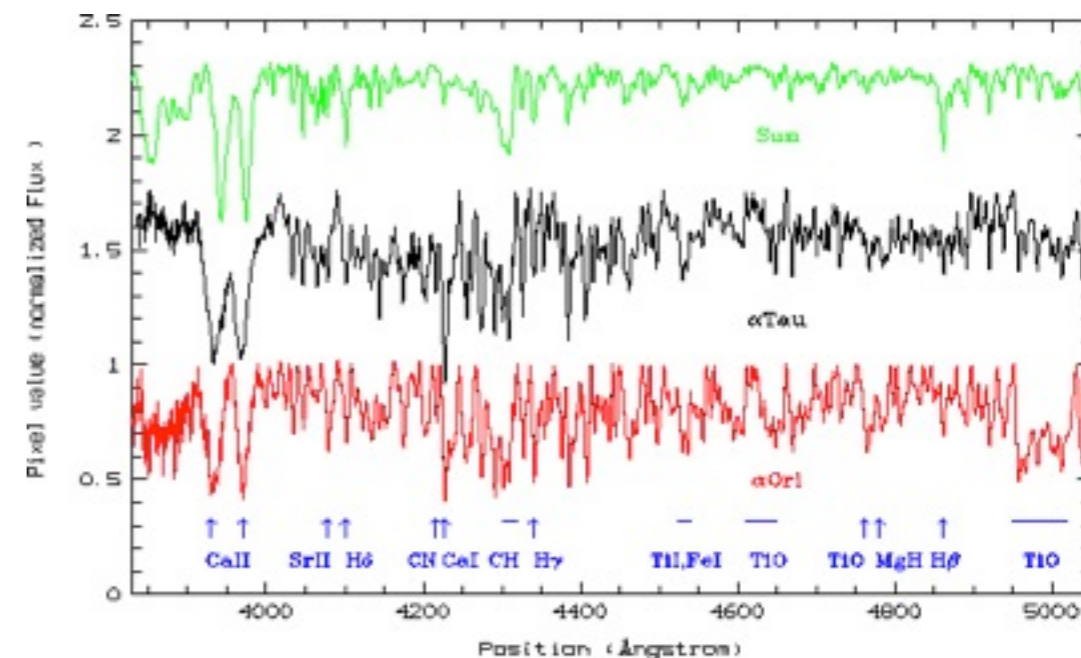
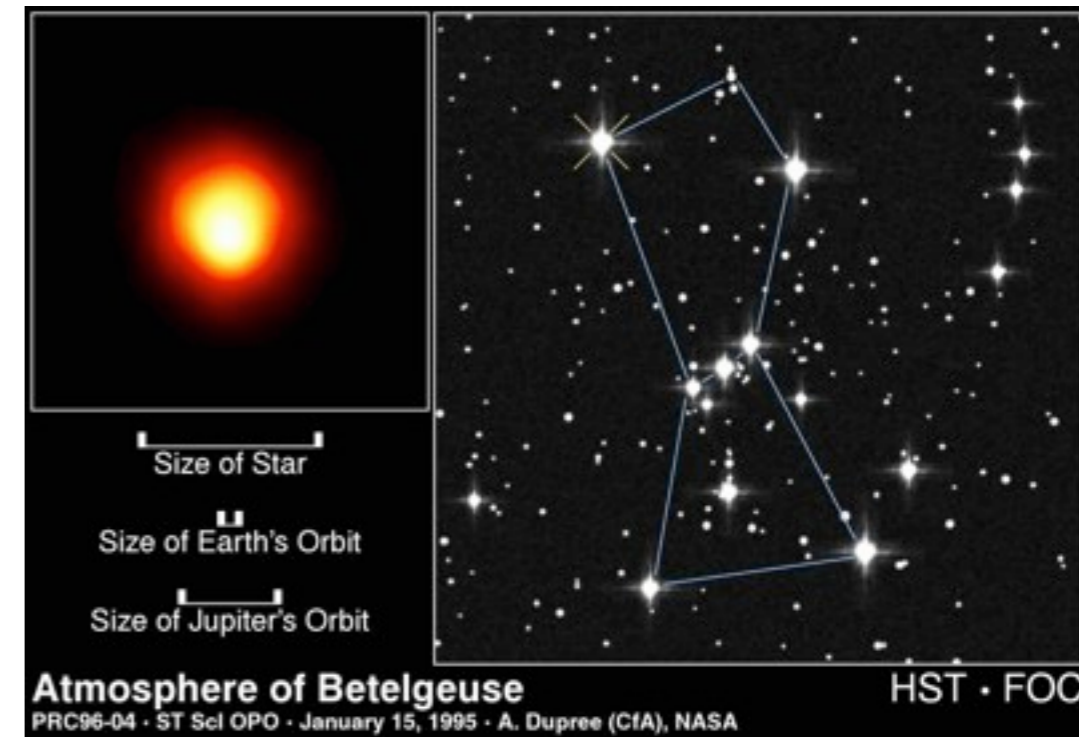
$$\sigma n L / (4 \pi r^2 c) - G M \rho / r^2 > 0,$$

σ : cross section

$$L_{\text{Eddington}} = 4 \pi c G M m_u / \sigma$$

赤色巨星

- 赤色超巨星
 - Betelgeuse, Antares
 - 星を取り巻く球殻状の塵→赤外線、電波
- ミラ型長周期変光星
 - OH, H₂O, SiO 分子線の強い電波源
- 膨張速度: 10~20 km/s
- 質量放出率: $10^{-7} \sim 10^{-5} M_{\odot}/\text{yr}$
- 最期は水素の外層は全て放出
 - ⇒ 惑星状星雲
 - ⇒ 白色矮星



赤色巨星の質量放出

- 塵(固体状物質)に働く放射圧
- 脈動変光星の脈動に伴う衝撃波
- 半径が大きい→浅い重力ポテンシャル

Planetary nebulae (惑星状星雲)



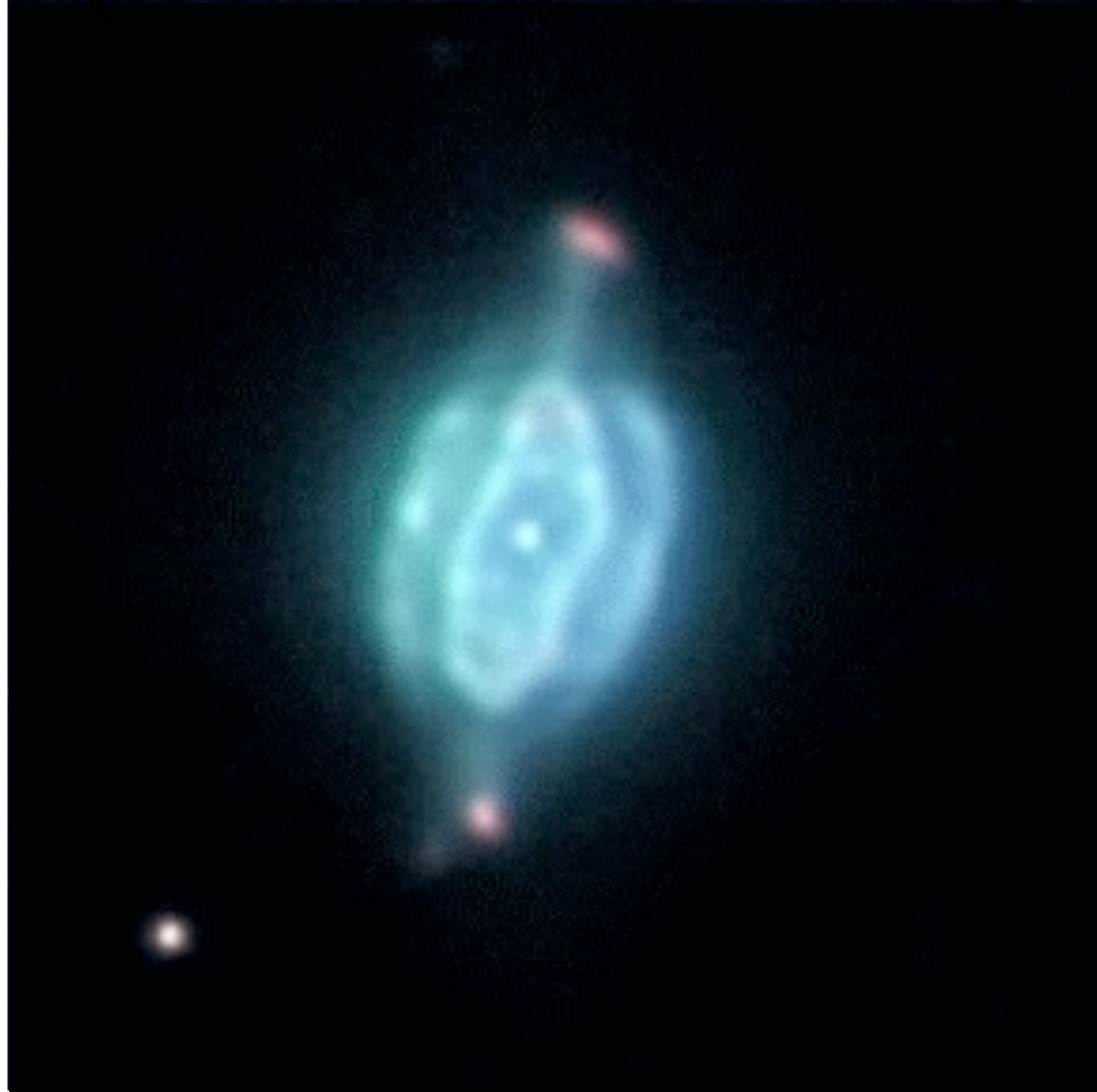
Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)



Planetary nebulae (惑星状星雲)

